ÜBER MESSUNGEN HOHER SPANNUNGEN.

INAUGURAL-DISSERTATION

VERFASST UND DER

HOHEN PHILOSOPHISCHEN FAKULTÄT

DER

KGL. BAYER. JULIUS-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT WÜRZBURG

ZUR

ERLANGUNG DER DOKTORWÜRDE

VORGELEGT

am 1. Februar 1903

VON

ERNST VOIGT

aus

GRANSCHITZ, PROV. SACHSEN.

LÜCHOW.
BUCHDRUCKEREI E. KÖHRING.
1903.

Dem Andenken
meines lieben Vaters.

I.

Die heutigen Untersuchungen über Kathodenstrahlen erfordern schon jetzt die genaue Messung von etwa 20000 Volt in maximo, doch ist bei weiterem Eindringen in dieses wichtige Gebiet mit Sicherheit der Wunsch zu erwarten, dass man auch ein Vielfaches dieser Spannung messen könnte. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit einer Methode, die gestattet Gleichspannungen bis 100000 Volt und noch darüber mit etwa $2^0/_0$ Genauigkeit zu messen.

Es hat schon früher nicht an Versuchen in dieser Richtung gefehlt. So beschrieben Abraham und Lemoine[1] eine nach Art der absoluten Platten-Elektrometer gebaute Anordnung; Messresultate sind jedoch von diesem Apparat nicht bekannt geworden.

Erfolgreicher hat Heydweiller[2] gearbeitet, dessen Instrument Messungen bis etwa 45000 Volt zulässt.

Diese Zahl dürfte überhaupt die Grenze für derartige Methoden bedeuten; hier fangen Glimmentladungen an sich bemerkbar zu machen; schon bedeutend früher tritt diese Gefahr bei den bekanntesten Apparaten dieser Art auf, dem Righi'schen Spiegelelektrometer und dem absoluten Plattenelektrometer.

Die scharfen Kanten an der Nadel des ersteren verbieten die Anwendung höherer Potentiale als etwa 30000 Volt, und auch das absolute Instrument versagt hierbei. Ist bei letzterem die Politur der Platten nicht mehr ganz vorzüglich, so fangen Ausströmungen schon früher an; da damit der Spannungsgradient im Dielektrikum sich ändert, sind gute Messungen dann nicht mehr möglich.

---

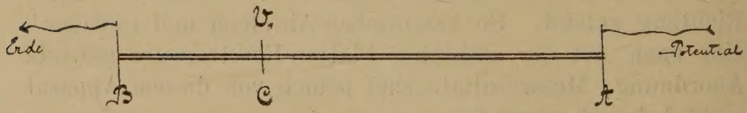
1) Journ. de Phys. (3) 4, 466; 1895.
2) Heydweiller. Wied. Ann. 48. p. 110. 1893.
Ztschr. f. Instrum. 12. p. 377. 1892.

Man kann nun auch die Spannung indirekt messen. Bei hohen Gleichspannungen hat man öfters Spannungsteilung durch vorgeschaltete Kondensatoren versucht, zumeist ohne Erfolg; doch man kann auch, wie in der vorliegenden Arbeit geschehen, eine Spannungsteilung erhalten durch Hervorrufen eines Spannungsabfalls an einem grossen Widerstande, durch den die zu messende Spannung einen Strom treibt. Dasselbe Princip wird in der praktischen Gleichstromtechnik bei der Strommessung mit Apparaten nach dem Deprez-Typus benützt; hier giebt der an den Enden eines stromdurchflossenen Widerstands gemessene Spannungsabfall ein Mass für die herrschende Stromstärke.

II.

Legt man einen hohen Widerstand AB (Figur 1.),

Figur 1.



dessen Wert pro cm Länge konstant ist, mit dem einen Ende (A) an das Potential, mit dem andern (B) an die Erde, so sinkt das Potential längst dieses Widerstandes linear von seinem Werte V bis auf 0; misst man in einem Zwischenpunkt (C) die Spannung V_1 elektrometrisch, so erhält man daraus

$$V = V_1 \frac{AB}{BC}.$$

Der Widerstand A B darf nicht zu kurz genommen werden, andernfalls würde sich in C durch Influenz von A aus eine Ladung ausbilden, die das Resultat natürlich vollständig entstellen würde, andernseits muss er auch genügend gleichmässig sein, weil nur dann bei einer Erwärmung auch eine gleichmässige Widerstandsänderung eintritt; da aber nicht die absoluten Widerstandswerte, sondern ihr Quotient in Rechnung kommt, wird das Resultat bei einer proportionalen Veränderung des Zählers und des Nenners nicht geändert.

Es soll der Widerstand ausserdem auch einen hohen Absolutwert besitzen, damit die durch ihn abgeleitete Elektricitätsmenge das Potential nicht merklich abschwächt und auch die Erwärmung gering ausfällt.

Zu den Versuchen stand eine zweiplattige Holtz'sche Influenzmaschine von 50 cm Scheibendurchmesser zur Verfügung; ihre gelieferte Elektricitätsmenge war verhältnissmässig klein; der Messwiderstand musste dementsprechend gross sein, er betrug bei der letzten Ausführung ca. 10^{10} Ohm. Bekanntlich fehlt es nun aber an gutem Widerstandsmaterial für Widerstände dieser Grössenordnung; es kommen in betracht Glas, Flüssigkeiten, Holz. Ganz abgesehen von sonstigen Eigenschaften des Glases, war auch das bestleitendste für den vorliegenden Zweck unbrauchbar, da ein Glaswiderstand zu kurz, und bei genügender Länge zu dick geworden wäre; der Gebrauch von Flüssigkeiten bot technische Schwierigkeiten, namentlich hinsichtlich des Gefässes, und erschien auch wegen Zersetzungserscheinungen nicht vorteilhaft, es blieb nur Holz übrig, das in der Tat auch genommen wurde. Man pflegt wohl bei Vorlesungen in ganz ähnlicher Weise an einem Holzstabe den Begriff des Potentialabfalles zu zeigen, indem man längst des Stabes in gleichen Abständen mehrere Holundermarkkügelchen anbringt und aus den nach der Erde zu abnehmenden Ausschlägen auf die Abnahme des Potentials schliesst. Diese Abnahme ist durchaus keine gleichmässige, wie sie den gleichen Abständen entsprechend sein sollte. Die Holzstäbe sind also für gewöhnlich nicht gleichmässig in elektrischer Beziehung; man kommt aber zu einem bedeutend besseren Resultat, wenn man verhältnismässig dünne Stäbe (nicht über 10 mm Durchmesser) und ausgesuchtes Material aus hartem Holz verwendet. Bei meinen Untersuchungen benützte ich nach Versuchen mit anderen Holzarten Ahornholz, das mehrere Jahre gelagert hatte, und auch schon im äusseren ein gleichmässiges Aussehen aufwies. Die Untersuchung zeigte eine befriedigende Uebereinstimmung zwischen dem elektrisch (siehe später) gemessenen Verhältnis $\frac{AB}{BC}$ und dem aus den Längendimensionen gewonnenen. Es war in zwei Fällen

elektrisch gefunden $\frac{AB}{BC} = 2{,}10$ und $4{,}30$ (Durchschnittswerte für längere Zeitdauer)

durch Längenmessung gefunden $\frac{AB}{BC} = 2{,}20$ „ $4{,}47$

Differenz 5% und 4%.

Bei den ersten Versuchen wurde der etwa 1 m lange Stab senkrecht isoliert aufgehängt und die Spannung am unteren Ende zugeführt, während das obere abgeleitet war. Es lag die Vermutung nahe, dass bei den hohen Spannungen auch längs des Stabes Verluste an die Luft auftreten könnten, und deshalb wurde zur Untersuchung dieses Verlustes um den Holzstab als Axe ein glatter Metallcylinder von 40 cm Durchmesser isoliert befestigt und durch ein Spiegelgalvanometer zur Erde abgeleitet. Das Spiegelgalvanometer konnte durch Umschaltung auch in die Leitung eingefügt werden, die von dem oberen Ende des Holzstabes zur Erde führte. Bei einer auf 50 000 Volt geschätzten Spannung zeigte sich nun, dass der durch den Blechcylinder zur Erde gehende Strom etwa 5% des durch den Holzstab gehenden Stromes ausmachte und auf etwa den fünffachen Wert stieg, sobald ein zerknittertes Stanniolblatt von etwa 100 qcm auf die Innenwand des Blechmantels geklebt wurde. Mit solch' beträchtlichen Verlusten konnte natürlich kein gutes Messverfahren erreicht werden, und es wurde daher zu dem Ausweg geschritten, die Verluste durch Einbettung des Holzstabes in ein festes Dielektrikum zu reduzieren. Dadurch wurde zugleich ein anderer Vorteil erreicht. Bei der wechselnden Luftfeuchtigkeit kann man es nicht verhindern, dass das Holz bald trockener und feuchter wird und damit zugleich das Verhältnis $\frac{AB}{BC}$ infolge ungleichmässiger Entwicklung dieses Vorgangs geändert wird. Dieser Uebelstand fiel jetzt auch fort. Das Nähere über diese Versuche wird weiter unten berichtet, hier sei nur noch erwähnt, dass bei dem definitiven Messwiderstand die beiden Widerstandsverhältnisse, die an diesem benutzt werden konnten, von den anfänglichen Werten 2,12 bezw. 4,40 innerhalb mehrerer Monate nur

Schwankungen zwischen 2,15 und 2,08 bezw. 4,47 und 4,23 beobachtet wurden.

III.

Zu den Messungen erschien mir das Instrument von Heydweiller wegen seiner Einfachheit und runden Gestaltung aller Einzelteile das vorteilhafteste zu sein. Seine Ausschläge sind den Quadraten der Spannung nahezu proportional. Es wurde nach den von Heydweiller gemachten Angaben mit geringen Aenderungen ausgeführt.

Das ganze messende System, zwei Paare Ring-Kugeln, befindet sich an einem Hohlcylinder von 3,5 cm Durchmesser und etwa 14 cm Länge; innerhalb des Cylinders befindet sich die bifilare Aufhängung; der Gefahr, dass durch die Klemmbacken, Schrauben etc. der Aufhängung — alles Teile mit scharfen Kanten — Elektricität ausströmt, ist durch diese Anordnung wirksam begegnet. Der Cylinder seinerseits wird von zwei horizontalen Glasstützen aus bestem Jenenser Bleiglas getragen. Die Stützen sind in Hohlcylindern befestigt, die über zwei senkrechten in einer Entfernung von 28 cm auf einer Grundplatte aufgestellten Säulen nach Bedarf verschoben werden können. Unterhalb des beweglichen Systems und mit ihm starr verbunden befindet sich ein dünner senkrechter Glasstab, der den Spiegel zur Ablesung und ein Dämpferflügelpaar trägt. Als Dämpferflüssigkeit wurde eine Mischung von Paraffinöl höheren und geringeren spezifischen Gewichts benützt. Durch Abpassung der Mischung konnte eine vorzügliche Dämpfung erreicht werden. Das Gefäss mit der Dämpfungsflüssigkeit wurde durch ein zweiteiliges Celluloidblatt vor Staub geschützt. Bei feuchtem Wetter kam es vor, dass sich infolge Oberflächenleitung am Glase in dem Dämpfungsgefässe eine Ladung ausbildete, die sich durch eine zuckende Bewegung im Fernrohr kund gab. Diese Störung wurde wirksam beseitigt einmal dadurch, dass das Gefäss mit Stanniol umwickelt wurde und ausserdem der Glasstab sorgfältig mit Alkohol und Aether abgewaschen wurde. Das Instrument wurde für eine maximale Spannung von ca. 22 000 Volt eingerichtet, die Spannung, die am abso-

iuten Elektrometer noch einwandfrei benutzt werden konnte und bei der auch später das Spiegelgalvanometer immer ohne Störung funktionierte.

Das absolute Schutzring-Elektrometer, mit dessen Hilfe die Aichung des Spiegelelektrometers geschah, wurde mit drei verschiedenen Abständen der Platten benützt. Die bewegliche Platte hing an dem einen Arm einer guten Wage; ihre weitere Annäherung an die darunter stehende, isolierte und geladene Platte wurde durch einen Anschlag über der Wagschale, die am anderen Arm hing, verhindert; der Anschlag bestand in einer feinen, durch Schraube beweglich angebrachten Spitze. Im ausbalancierten Zustande musste auf der einen Seite der Wage die Ebene der beweglichen Platte mit der Ebene des Schutzrings zusammenfallen, auf der anderen Seite die Anschlagspitze die Wagschale eben ohne Druck berühren. Nach Belastung der Wagschale wurde die isolierte Platte mit einem höheren Potentiale als dem zu messenden beschickt, die Arretierung gelöst und nunmehr in bekannter Weise durch eine abgeleitete Spitze das Potential allmählich erniedrigt, bis die Gewichte auf der Wagschale die Wage aus dem Gleichgewichte brachten; in demselben Augenblicke wurde am Spiegelelektrometer der herrschende Ausschlag abgelesen. Diesen kritischen Moment zu erkennen giebt es verschiedene Wege. Meist ist man so verfahren, dass man durch Wagschale und Anschlagspitze einen Stromkreis für ein Telephon oder Galvanometer schloss und durch Aufhören des Geräusches bezw. des Ausschlages den kritischen Moment bestimmte.*) Auf diese Weise habe ich keine guten Resultate erlangen können, ich habe dagegen mit einem anderen Verfahren, die Zunge der Wage nämlich direkt ins Fernrohr zu spiegeln, das Ziel erreicht. Ueberhaupt ist das Arbeiten mit dem absoluten Elektrometer im Anfang nicht leicht; die Justierung des Schutzrings und der beweglichen Platte, die Equilibrierung der Wage und die Ablesung am Spiegelelektrometer erfordern schon grössere Uebung, falls man mit einer Genauigkeit von 1% arbeiten will. Die Abstände der Platten wurden teils mit Hilfe von Spiegelglasplatten, teils mit einem kleinen, planparallel

*) Paschen, Wied. Ann. 37. p. 69. 1889.

abgedrehten Metallcylinder, der zwischen den Platten verschoben wurde, festgelegt.

Bezüglich der ganzen Aufstellung zwecks Aichung sei noch Folgendes mitgeteilt:

Die Influenzmaschine wurde mit passender konstanter Tourenzahl von einem Elektromotor angetrieben; die beiden Elektrometer waren durch eine mehrere Meter lange Leitung, die in Glasrohre mit Paraffin eingeschmolzen war, mit der Influenzmaschine verbunden; die Axe des Spiegelelektrometers hatte von der Fernrohrskala eine Entfernung von 1060 mm, die Wage mit dem Elektrometer stand links neben dem Beobachter in Reichnähe, sodass sie bequem mit der linken Hand bedient werden konnte. Eine im übrigen durch Pappe abgeblendete Glühlampe beleuchtete intensiv den Zeiger der Wage; in der oberen Hälfte des Gesichtsfeldes des Fernrohres erschien derselbe als schwarzer scharfer Strich, in der unteren Hälfte wurde die Skala beobachtet. Mit der Influenzmaschine waren noch zwei Leydener Flaschen von je 800 cm Capacität verbunden, und zwar die eine direkt, die andere mit Zwischenschaltung eines etwa 20 cm langen Holzstabes, der einen Widerstand von ca. 10^9 Ohm darstellte.

Nachdem die Flaschen mit einem höheren Potentiale geladen, wurde zwecks allmählicher Potentialerniedrigung ein abgeleitetes Spitzenbüschel in die Nähe der Kugeln der Flaschen gebracht; das Spitzenbüschel war durch einen Faden mit einem Räderwerk (altes Uhrwerk) verbunden. Der Beobachter konnte durch einen Hebel und Griff, mit dem die letzte Radaxe verbunden, das Räderwerk betätigen, und so das damit verbundene Spitzenbüschel ganz langsam der Kugel der Leydener Flasche nähern. Einer Umdrehung an der letzten Radaxe entsprach an dem Spitzenbüschel eine Bewegung von weniger als 0,1 mm; infolgedessen fand auch die Potentialerniedrigung mit der gewünschten, geringen Geschwindigkeit statt.

Um das Spiegelelektrometer war ein abgeleiteter Schutzcylinder von 50 cm Durchmesser gestellt.

Die 3 Abstände, mit denen beim Schutzringelektrometer gearbeitet wurde, betrugen 1,516, 0,886 und ca. 0,4 cm. Die Messungen mit dem letzten Abstand waren

nur Relativmessungen, die an die anderen Messungen angeschlossen wurden, sie hatten den Zweck für Ausschläge unter 90 Skalenteilen die Proportionalität mit dem Quadrat der Spannung zu untersuchen. Für die beiden anderen Abstände wurden je zwei vollständig neue Aufstellungen der Wage und des absoluten Elektrometers gemacht; für ein bestimmtes Potential, das bei beiden Abständen mit genügender Genauigkeit erreicht werden konnte, konnten auf diese Weise 4 von einander unabhängige Werte des Reduktionsfaktors des Spiegelelektrometers erhalten werden; ihre Abweichungen von einander gaben ein Mass für die erreichte Genauigkeit; die vier Werte waren 1121, 1124, 1134, 1131 in weiter unten angegebenen Einheiten. Der Unterschied zwischen kleinstem und grösstem Wert beträgt nicht ganz 1,2 %, die grösste Abweichung vom Mittelwerte 1127 jedoch nur 0,6 %. Mit Hilfe dieses Mittelwertes — giltig für einen bestimmten Ausschlag — wurden nun auch die Messungen bei den anderen Ausschlägen ausgeglichen.

Die Abmessungen des Schutzring-Elektrometers waren folgende:

Innerer Radius des Schutzrings	$= R_1$	$=$	6,169 cm,
Radius der beweglichen Platte	$= R_2$	$=$	6,043 „ ,
Breite der Fuge zwischen Schutzring und beweglicher Platte	$= b$	$=$	0,126 „ ,
Abstand der Platten	$= a$	$=$	1,515 „ ,
bezw.		$=$	0,886 „ .

Ist f die wirkame Fläche und k die gegenseitige Anziehungskraft der Platten, wird ferner Schutzring und bewegliche Platte durch Erdleitung auf dem Potential 0 gehalten, so ist

$$k = \frac{1}{8\pi} \frac{f}{a} V_e^2 \text{ oder}$$

$$V_e = a \sqrt{8\pi \frac{k}{f}}.$$

Dabei ist k in Dynen gemessen und V_e in elektrostatischen Einheiten. Zum Uebergang auf Gramm und elektromagnetische Einheiten ist noch einzuführen

$$k = 981\ p,$$
$$V_e = \frac{V}{300},$$

wenn p die Belastung der Wage in Gramm und V die Spannung in Volt bedeutet. Es wird also

$$1)\quad V = 300\ a \sqrt{8\ \pi \frac{981\ p}{f}}.$$

Die wirksame Fläche f berechnet sich nach Maxwell zu

$$f = \frac{\pi}{2}\left(R_2^2 + R_1^2 - b\ \frac{R_2 + R_1}{1 + 4{,}5\ \frac{a}{b}}\right)$$

Am Spiegelelektrometer ruft die Spannung V den Ausschlag α hervor; der Reduktionsfaktor sei C, dann ist

$$2)\quad V = C\ \sqrt{\alpha}.$$

Aus den beiden Gleichungen lässt sich C berechnen. Bei Einsetzung numerischer Werte folgt für die beiden Plattenabstände

$$C = 6576 \sqrt{\frac{p}{\alpha}}$$

$$\text{bezw. } 3861 \sqrt{\frac{p}{\alpha}}.$$

In der folgenden Tabelle 1. stellt jede Zahl den nach obiger Weise ausgeglichenen Mittelwert aus zwei anderen Zahlen dar, die ihrerseits jede aus dem Mittelwert von je 2 bis 4 Einzelbeobachtungen berechnet ist. Die Belastungen variierten zwischen 7 und 17 Gramm.

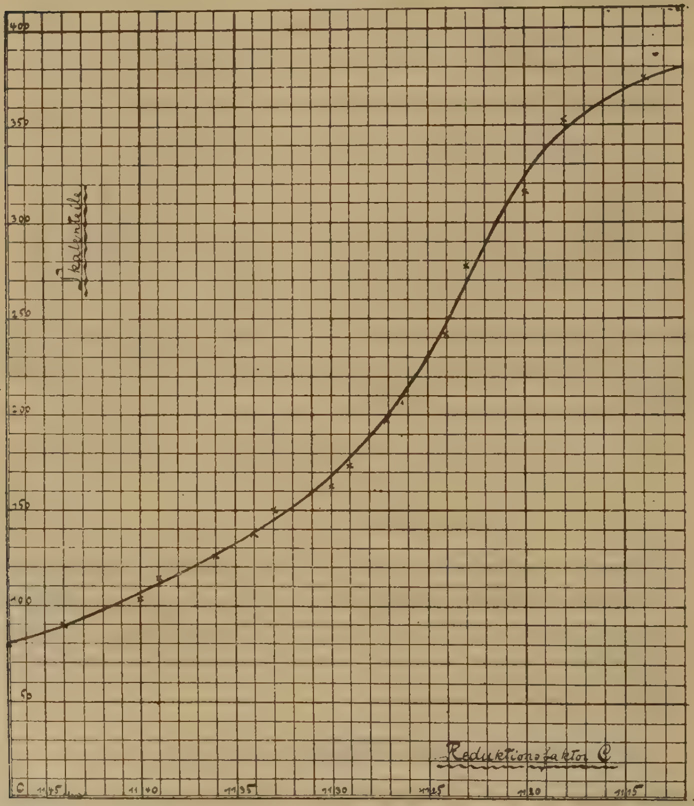
Tabelle 1.

Ausschlag α	371,9	305,8	315,2	277,5	241,8	197,2
Reduktionsfaktor C	1114	1118	1120	1123	1124	1127

174	162,2	150	138	126,1	114,4	102,8	90,6	79
1129	1130	1133	1134	1136	1139	1140	1144	1147
67,2	55,9	44,2	27,9	20,7				
1147	1147	1147	1147	1147				

Um auch die Genauigkeit der Messungen in sich zu prüfen, wurden die Werte der Tabelle nach Art der Figur 2.

Figur 2.



graphisch aufgetragen. Das Resultat befriedigte. Unter α ist der Ausschlag in Skalenteilen verstanden, eine sonst übliche Reduktion auf Bogen hätte die Abweichungen von der Proportionalität kleiner erscheinen lassen, aber im übrigen die Messmethode durchaus nicht vereinfacht. Es erschien wünschenswert festzustellen, wie weit die Aichung mit Zahlen übereinstimmte, welche mittelst Tabellen über Funkenpotentiale zu gewinnen waren. Zu diesem Zwecke wurde das Potential an drei Funkenstrecken 0,4, 0,5 und 0,6 cm gemessen.

Die Kugeln, zwischen denen die Funken übersprangen, waren auf den 20 cm hohen Glasstützen eines Funkenmikrometers befestigt und vor dem Versuch sauber poliert. Die aus den Tabellen von Paschen-Heydweiller entnommenen Zahlen sind auf den bei meinen Versuchen herrschenden Druck und Temperatur reduziert.

Tabelle 2.

Kugeln von 1 cm Durchmesser. Volt.

Abstand cm	0,4	0,5	0,6	
Paschen-Heydweiller	14550	17530	20310	
1. Messung	14830	17430	20320	
Differenz	+ 1,9 %	— 0,6 %	+ 0,05 %	
2. Messung	14530	17560	20580	
Differenz	— 0,14 %	+ 0,17 %	+ 1,3 %	

Bei der 2. Messung wurde der Abstand der Kugeln neu eingestellt. Auch das Resultat befriedigte.

IV.

Für die Messmethode durch Potentialabfall längs eines Widerstandes ist es wichtig, dass das Elektrometer selbst nur einen geringen Elektricitätsverlust verursacht. Namentlich müssen Verluste durch Streuung an die Luft auf ein Minimum beschränkt werden, da ein solcher Verlust experimentell schwer zu fassen ist und deshalb etwaige nötige Korrektionen kaum bestimmt werden könnten. Dagegen ist der Verlust durch Ohm'schen Widerstand der Glasstützen und Leitungsbefestigungen wohl zu berücksichtigen.

Lädt man einen Leiter auf ein bestimmtes Potential und überlässt ihn dann sich selbst, so sinkt das Anfangspotential v_1 während der Zeit t auf den Wert v_2; ist der Widerstand und Capacität des Leiters bezw. w und c, so ist, wenn das Ohmsche Gesetz giltig ist,

$$3)\quad w\ c = \frac{t}{\lg\ nat \frac{v_1}{v_2}}.$$

Macht man jetzt nach verschiedenen, aber untereinander gleichen Zeiten, z. B. 10", Beobachtungen von v_1 und v_2, so muss bei konstantem w und c der Quotient $\frac{v_1}{v_2}$ eine Konstante darstellen; andernfalls läge hier ein Beweis für bedeutenderen Elektricitätsverlust an die Luft. Ich gebe in Tabelle 3 eine bezügliche Beachtungsreihe.

Tabelle 3.

Zeit	0"	10"	20"	30"	40"	50"	60"	70"	80"	90"	100"	110"	120"
Volt	20500	18800	17500	16300	15400	14600	13800	13200	12600	12000	11500	11100	10700
v_1/v_2	1,09	1,08	1,07	1,06	1,06	1,06	1,05	1,05	1,05	1,05	1,04	1,04	

Anfangs war, wie aus der Tabelle hervorgeht, der Verlust etwas grösser als zuletzt, es schien also ein kleiner

Verlust durch Streuung an die Luft vorzuliegen. Natürlich kam dieser kleine Betrag nicht in Betracht.

Zur Bestimmung des Ohm'schen Widerstands des Instruments gemäss Formel 3) ist die Kenntnis der Capacität c nötig. Zu ihrer Bestimmung schaltete ich zum Elektrometer einen bekannten Zusatzwiderstand von bekannter Capacität; alsdann hat man folgende Beziehungen.

Zunächst wird der Zusatzwiderstand eingeschaltet, sein freies Ende aber nicht zur Erde abgeleitet. Infolge der Art der Aufstellung war dann in Formel 3) das w nicht verändert, jedoch ging die Capacität c in c_1 über, es ist also

$$4)\quad w\, c_1 = \frac{t_1}{\lg \frac{V_1'}{V_2'}}.$$

Das freie Ende des Zusatzwiderstandes wurde jetzt abgeleitet; der Zusatzwiderstand sei w_2 und seine Kapacität c_2, alsdann ist

$$5)\quad \frac{w\, w_2}{w + w_2}\,(c_1 + c_2) = \frac{t_2}{\lg \frac{V_1''}{V_2''}}.$$

Aus diesen beiden Gleichungen kann man nach einigen Rechnungen finden

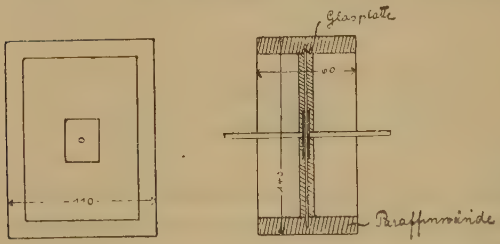
$$6)\quad w = w_2\, \frac{t_2 \lg \frac{V_1'}{V_2'} - t_1 \lg \frac{V_1''}{V_2''}}{\lg \frac{V_1'}{V_2'}\left(w_2\, c_2 \lg \frac{V_1''}{V_2''} - t_2\right)}.$$

Man erhält w direkt und brauchte eigentlich die Capacität c gar nicht zu bestimmen; jedoch war zur schnellen Kontrole über den Widerstand während der ganzen Dauer der Messungen deren Kenntnis wünschenswert; der Zusatzwiderstand konnte dann entbehrt werden. Man findet sie, indem man den Zusatzwiderstand jetzt ganz wegnimmt und nun eine Beobachtung anstellt; aus Formel 3) folgt sofort c. Diese letzte Messung muss man sofort im Anschluss an die vorhergehenden machen, weil sich bei

feuchtem Wetter w nach längerer Pause leicht um eine Potenz von 10 verändern kann.

Zur Erreichung günstiger Messverhältnisse musste der Zusatzwiderstand einen Widerstand von ungefähr 10^{12} Ohm haben; Glas war das gegebene Material. Es hat Schwierigkeiten gemacht, einen auch nur stundenlang konstant bleibenden Widerstand dieser Grösse herzustellen. Die schliessliche Form des Widerstandes zeigt Figur 3.

Figur 3.*)



Eine alte photographische Platte (9×12 cm) wurde ringsum mit Wänden aus Paraffinplatten umgeben. Die Platten wurden aus den gewöhnlichen Paraffintafeln mit der Säge passend geschnitten und mit Hilfe eines erwärmten Bandeisens (40 mm breit und 4 mm dick) an den Kanten mit einander dicht verschmolzen. Jede Seite der Glasplatte erhielt dann einen Metallbelag von je 2 qcm Fläche, der mit Stanniol dicht aufgelegt und mit Kitt befestigt wurde; jede Fläche wurde hierauf mit Paraffin übergossen, so dass nur die Zuführungsdrähte herausragten. Die Messung geschah durch Spannungs- und Strommessung, und zwar gleich mit Hochspannung, bei der ja nachher auch der Widerstand benützt wurde. Eine kleine, durch Elektromotor angetriebene Wimshurst-Maschine lieferte eine auf Prozente konstante Spannung; an die Maschine war durch einen grösseren Widerstand eine Leydener Flasche angeschaltet. Die Spannung wurde mit dem Spiegelelektrometer gemessen, der Strom dagegen durch ein Deprez-Spiegelgalvanometer von Siemens & Halske; seine Empfindlichkeit betrug $5{,}2 \cdot 10^{-10} \frac{\text{Ampere}}{\text{Skalenteil}}$. Tabelle 4. giebt Auskunft über die Messung.

*) Alle Masse, auch bei den folgenden Figuren, in mm.

Tabelle 4.

Volt	Ampere	$\frac{\text{Volt}}{\text{Amp.}}$ = Ohm	
8400	4. 10^{-9}	2,1. 10^{12}	Mittel
12000	5,9. 10^{-9}	2. 10^{12}	1,7. 10^{12}
15800	9,2. 10^{-9}	1,7. 10^{12}	
19000	1,2. 10^{-8}	1,6. 10^{12}	

Infolge allmählicher Erwärmung wurde der Widerstand kleiner, bei einem zweiten Versuche, der 14 Tage später angestellt wurde, wurde der Strom erst einige Zeit auf mittlerer Stärke erhalten. Die Messung ergab:

Tabelle 5.

Volt	Ampere	Ohm	
10900	5,8. 10^{-9}	1,9. 10^{12}	Mittel
16500	9,0. 10^{-9}	1,8. 10^{12}	1,8. 10^{12}
19900	1,1. 10^{-8}	1,8. 10^{12}	

Der Widerstand war also genügend konstant. Es war nun noch die Capacität c_2 des Zusatzwiderstandes zu bestimmen. Das geschah mit der Methode von Harms.[1])

Eine Kugel von 15,5 cm Radius und Capacität wurde frei in der Luft an einem 2 mm dicken Glasfaden aufgehängt und mit 6 Volt geladen. Ihre Elektricitätsmenge wurde durch ein Elektrometer von Günther, Braunschweig entladen. Eine Entladung nach 15" oder 30" Pause brachte denselben Ausschlag, Verluste waren also zu vernachlässigen. Die Ausschäge waren 140, 135, 135 Skalenteile. Um bei der Entladung der zu messenden Capacität c_2 ungefähr denselben Ausschlag zu haben, durfte nur mit 2 Volt geladen werden. Ausschläge nach 15" waren 130,

[1]) Physik Zeitschr. Okt. 1902. Dr. Harms war selbst so freundlich, mir die Messung mit seinen Apparaten auszuführen.

135 Skalenteile. Hier betrug der Verlust für 15" ca. 17 Skalenteile, der korrigierte Ausschlag wurde 152.

Aus diesen Angaben ergiebt sich die Capacität

$$c_2 = \frac{6}{2}\, 15{,}5\, \frac{152}{135}$$
$$= 52 \text{ cm}$$
$$= 5{,}8 \,.\, 10^{-11} \text{ Farad.}$$

Es folgen jetzt die Versuche am Spiegelelektrometer selbst in der Weise, wie oben beschrieben. Die Angaben in Volt der Tabelle 6. sind Mittelwerte aus mehreren Einzelmessungen, die um einige Prozente differierten. Aus der Formel 6) berechnet sich jetzt der Wert w zu

$$w = 2{,}9 \,.\, 10^{12} \text{ Ohm.}$$

Tabelle 6.

Volt.

	I. Zusatzwiderstand am Elektrometer angeschaltet aber nicht abgeleitet.	II. Zusatzwiderstand am Elektrometer und zur Erde abgeleitet.	III. Ueberhaupt ohne Zusatzwiderstand.
Beginn	20400	20400	20400
nach 60"	16200	13800	15800
nach 120"	14100	10700	13500

Die Capacität des Instrumentes mit Zuleitungen wird

$$7) \quad c = 10 \,.\, 10^{-11} \text{ Farad.}$$

Die Messungen wurden durch Auftreten des Rückstandes sehr erschwert, eine grosse Genauigkeit kommt ihnen nicht zu. Zur Orientierung darüber wurde c noch mit Hilfe eines anderen Zusatzwiderstandes bestimmt, bei

dem $c_2 = 0$ war. Es war dies ein etwa 10 cm langer und 0,5 cm dicker Glasstab, dessen Widerstandswert direkt vor und nach der Hauptmessung wie oben durch Strom- und Spannungsmessung gefunden wurde. Diese Messungen führten zu dem Werte

$$8)\quad c = 6 \, . \, 10^{-11} \text{ Farad.}$$

Ein Mittelwert

$$9)\quad c = 8 \, . \, 10^{-11} \text{ Farad}$$

war für den vorliegenden Zweck genügend genau.

Von Zeit zu Zeit wurde die Isolation untersucht. Der oben angegebene Wert von 3.10^{12} Ohm war der kleinste, der überhaupt gefunden wurde. Die oben beschriebenen Messungen wurden nämlich gegen Ende September bei sehr feuchtem Wetter ausgeführt. Als dann im Oktober die Luftheizung mit ihrer enorm trocknenden Wirkung in Betrieb kam, stieg der Isolationswiderstand und hielt sich während des Winters auf einer Höhe von 2.10^{13} Ohm. Die Isolation war später so ausgezeichnet, dass sich ein Potential von 10000 Volt auf dem Instrument während einer halben Stunde auf Prozente konstant hielt.

V.

Den ersten Messwiderstand, den ich herstellte, goss ich in Paraffin ein. Der Holzstab von 120 cm Länge und 10 mm Durchmesser wurde in der Achse eines ebenso langen Pappcylinders von 7 cm Durchmesser befestigt, senkrecht aufgestellt und nunmehr mit Paraffin umgossen. Schon hier trat aber die grosse Neigung der Masse zur Bildung von Blasen und ganzen Hohlräumen in wenig erfreulicher Weise zu Tage. Zur Vermeidung der Blasenbildung wurde ein zweiter Widerstand mit besonder Vorsicht ausgeführt, indem Paraffin während mehrerer Stunden allmählich nachgegossen und so die Oberfläche lange Zeit flüssig erhalten wurde. Aber auch hier zeigte sich die Blasenbildung. Einmal machte sie sich in interessanter Weise geltend. Die Verbindung des Widerstands mit der Zuleitung geschah durch kleine Quecksilbermengen, die

direkt in kleine Löcher im Paraffin eingefüllt waren. Mitten während des Arbeitens schlug nun plötzlich an dieser Stelle durch die 3 cm dicke Paraffinschicht ein Funke hindurch. Als das Paraffin nach Entfernung des Quecksilbers durchsägt wurde, zeigte sich, das hier die ganze Masse unter dem Loch von kleinen Quecksilberkügelchen durchsetzt war. Durch die anziehende Wirkung der Ladungen des hohen Potentials hatte sich das Quecksilber durch die kleinen Bläschen im Paraffin nach der abgeleiteten Grundfläche hindurchgedrängt.

Auch ein schichtenweises Eingiessen des Paraffins brachte nicht das erwünschte Resultat, und es wurde schliesslich noch ein letzter Versuch mit einer horizontalen Gussform aus Blech gemacht; sie wurde über einem Dampfkessel aufgestellt und mit Tüchern umwickelt, damit das Paraffin sich ganz langsam abkühlen konnte. Auch hier blieb der Erfolg aus.

Es musste daher von dem Paraffin abgesehen werden; denn bei solcher Blasenbildung musste immer die Befürchtung vorliegen, dass sich Glimmentladungen ausbildeten, die das Resultat natürlich in ganz unkontrolierbarer Weise verändert hätten. In der Tat trat einmal bei einer Zuleitung, die mit einer 2 cm dicken Paraffinschicht umgossen war, plötzlich mitten auf der Paraffinfläche eine Büschelentladung auf; auch hier waren Bläschen die Ursache.

Versuche mit Mischungen aus Paraffin und reinem, sonnengebleichten Bienenwachs zeigten nun ein weit besseres Verhalten bezüglich Blasenbildung, und der definitive Widerstand wurde mit einer Mischung von 2 Teilen Paraffin und 1 Teil Wachs hergestellt. Bei dieser Mischung wurde, wie Proben zeigten, mit Sicherheit jede Blasenbildung vermieden, nur an der Oberfläche waren kleine Bläschen sichtbar, die aber nicht tiefer als wenige Millimeter gingen. Jedoch dürfte es sich künftig empfehlen noch etwa 20% Colophonium zuzusetzen; dadurch wird die Haftfestigkeit der Isoliermasse am Holz noch vergrössert. Natürlich muss diese Isoliermasse auch frei von Fremdkörpern sein. Ich habe die Mischung in einer Kerzenfabrik über Wasser

schmelzen lassen und dadurch eine schöne reine Masse erhalten, deren Isoliervermögen ausgezeichnet war.

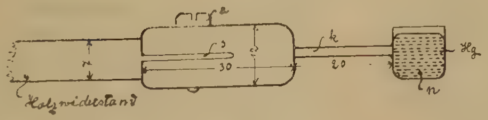
Es sei noch bemerkt, dass beim Eingiessen der Mischung der Holzstab durch Seidenfäden in der richtigen Lage festgehalten wurde.

Schon oben wurde erwähnt, dass Ahornholz zur endgültigen Anordnung genommen war. Der runde Holzstab war etwa 115 cm lang und war auf der Hobelmaschine auf den überall gleichen Durchmesser von 7 mm gebracht. Er war sauber geglättet und poliert, um jegliche Spitzenwirkung zu vermeiden; ausserdem wurde dadurch verhindert, dass sich das Holz voll Paraffin sog und seinen Widerstand änderte; auch war eine reinliche Scheidung zwischen Leiter und Isolator natürlich erwünscht. Nach dem Polieren wurde der Stab erst einige Tage an einem trockenen Ort belassen, damit der Alkohol der Politur sich verflüchtigte.

Behufs Zu- und Ableitung des Stromes waren bei den Vorversuchen die Enden des Stabes einfach mit Messingkappen versehen, welche fest aufgeschlagen worden waren. Als dann der Holzstab wieder aus der Masse herausgenommen wurde, zeigte es sich, dass die Kappe ganz lose war; bei der hohen Temperatur (80—100°) des flüssigen Paraffins hatte das Holz seine Elasticität verloren und dem Drucke nachgegeben. Diese schlechte Verbindung war wahrscheinlich auch die Ursache, dass bei einer galvanometrischen Messung des Widerstandes mittels Ausschlagmethode keine präcise Einstellung des Galvanometers zu erzielen war. Die Kappe wurde deshalb bei dem letzten Versuche noch mit einer durch das Holz gehenden Schraube befestigt.

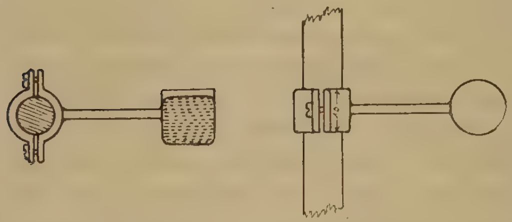
Figur 4. zeigt eine Ansicht der Kappen. Ein Messingcylinder ist auf den Holzstab gut aufgepasst und mit einem Schlitz s versehen; hierdurch ist es möglich, mittelst der Schraube a den Cylinder fest auf das Holz zu pressen. Der Quecksilbernapf n ist nicht direkt

Figur 4.



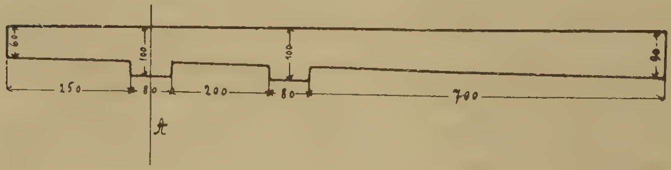
an den Cylinder angeschlossen, sondern erst mit Hilfe des 2 cm langen Metallstiftes k, der an den Napf angelötet ist. Dieser Stift hat den Zweck die Fortpflanzung kleinerer Temperaturschwankungen durch die Metallteile nach dem Holzstab zu verhindern. Für Gleichmässigkeit des Widerstandes ist natürlich in erster Linie eine über den ganzen Holzstab gleiche Temperatur nötig. Figur 5. giebt 2 Ansichten der Klemmvorrichtung, die zur Abnahme des Potentials an zwei Stellen des Holzstabes dienten. Hierbei ist nur zu bemerken, dass alle scharfen Kanten nach Möglichkeit beseitigt wurden.

Figur 5.



Figur 6. giebt die Masszahlen (in mm) der Blechform,

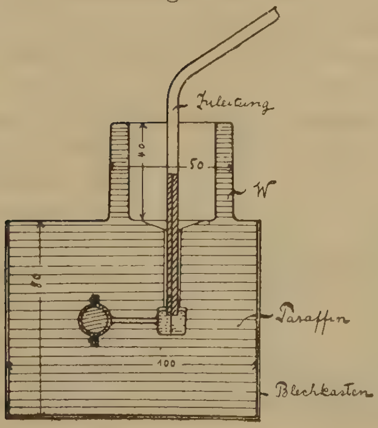
Figur 6.



in die der Holzstab eingegossen wurde. Die Höhe der horizontalen Form, die aus Zinkblech hergestellt war, betrug durchweg 8 cm.

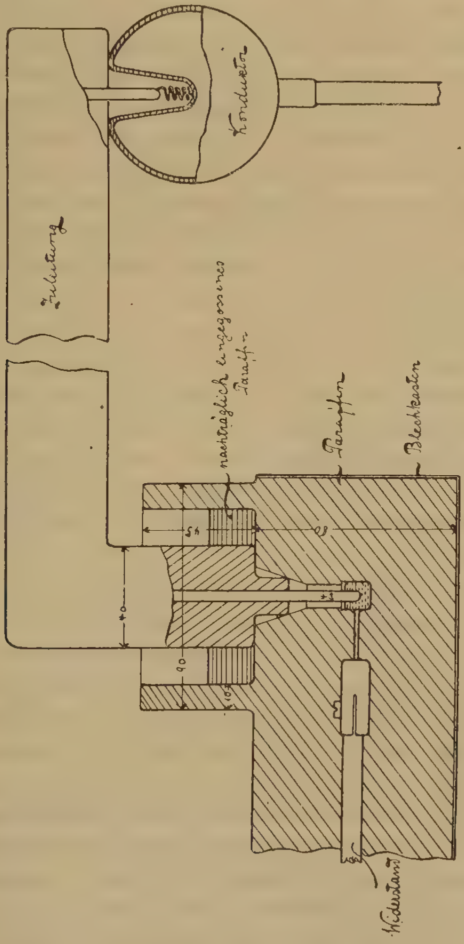
Figur 7. giebt einen Schnitt durch den fertigen Widerstand, an der Stelle A der Figur 6. Die Wände W, die um die Kontaktstelle gelegt sind, sind aus Paraffinplatten hergestellt und sollen einen

Figur 7.



Verlust der Elektricität durch Oberflächenleitung vermeiden lassen. Der Boden der auf diese Weise gebildeten Zelle hat eine trichterförmige Gestalt bekommen; Quecksilber, das beim Umschalten vom Leiter mitgenommen wird, rinnt von der schiefen Fläche nach dem Napf zurück.

Figur 8. zeigt diejenige Stelle der Anordnung, an der der Strom dem Holzwiderstand zugeleitet wird. Es hat grosse Schwierigkeiten gemacht, eine brauchbare und haltbare Konstruktion ausfindig zu machen. Bis zu 60 000 Volt konnte man mit gewöhnlichen Vorsichtsmassregeln noch ganz gut arbeiten, darüber hinaus begannen an den Zuleitungen und der Quecksilberkontaktstelle intensive Glimmentladungen stattzufinden, die das Potential ganz schwankend machten und überhaupt ein Ueberschreiten von 70 000 Volt zuerst*) gar nicht erlaubten—selbst wenn die 2 Platten der Holtz'schen Influenzmaschine,



Figur 8.

*) Das später erreichte Maximum war 94000 Volt, siehe weiter unten.

mit der die Versuche gemacht wurden, mit der grösstzulässigen Geschwindigkeit bewegt wurden. Zuerst waren, wie in Figur 7. nur Paraffinwände um die Oeffnung zum Quecksilbernapf gelegt und die in Paraffin eingebettete Zuleitung einfach fest in das Loch gedrückt. Ueber die Paraffinwände jedoch hinweg und durch die Aufsatzstelle der Wände auf die eigentliche Isoliermasse hindurch ergossen sich Glimmentladungen, ebenso wie die Zuleitung selbst überall Büschelentladungen zeigte. Die etwa 50 cm lange Zuleitung wurde darauf mit der Mischung Paraffin-Wachs in einer besonderen Form umgossen und darauf nach Figur 8. an den Widerstand einerseits und an den Konduktor der Influenzmaschine andererseits angebaut; es hat sich als vorteilhaft herausgestellt, den Leiter hierbei nicht zu dünn zu nehmen; denn je kleiner der Krümmungsradius, um so grösser der elektrostatische Druck und infolge dessen die Gefahr einer Entladung. Der Leiter besass hier 4 mm Durchmesser.

An der Konduktorseite endigte der Zuleitungsdraht in einem stumpfen Ende von 20 mm Länge; daran war eine Spiralfeder gelötet. Dieses ganze freie Ende tauchte in eine Oeffnung der Konduktorkugel, derart, dass die Feder mit gutem Druck an der Kugeloberfläche anlag, zugleich wenn sich der Isoliermantel der Zuleitung auf den Rand der Oeffnung auflegte.

Erst mit solch' sorgfältig gebauter Zuleitung konnte ein Potential von annähernd 100 000 Volt an der Konduktorkugel der Influenzmaschine erreicht werden. Wie gut jetzt die Isolation war, geht daraus hervor, dass man die Zuleitung, die mit einem Isolationsmantel von etwa 2 cm Stärke umgeben war, auch bei dem höchsten Potential ruhig anfassen konnte; beim Berühren leitete man nur kleine Elektricitätsmengen ab, die durch Capacitätswirkung entstanden waren. Wie aus der gleichzeitigen Beobachtung des Spiegelelektrometers hervorging, wurde das Potential durch die Berührung nicht merkbar verkleinert. — Auch die Isolation des Messwiderstandes war sehr gut. Um eine etwa von dem Holz nach der Gefässwandung fliessende Elektricität zu erkennen, wurde das Gefäss isoliert aufgestellt; die freie Oberfläche der Isoliermasse wurde mit

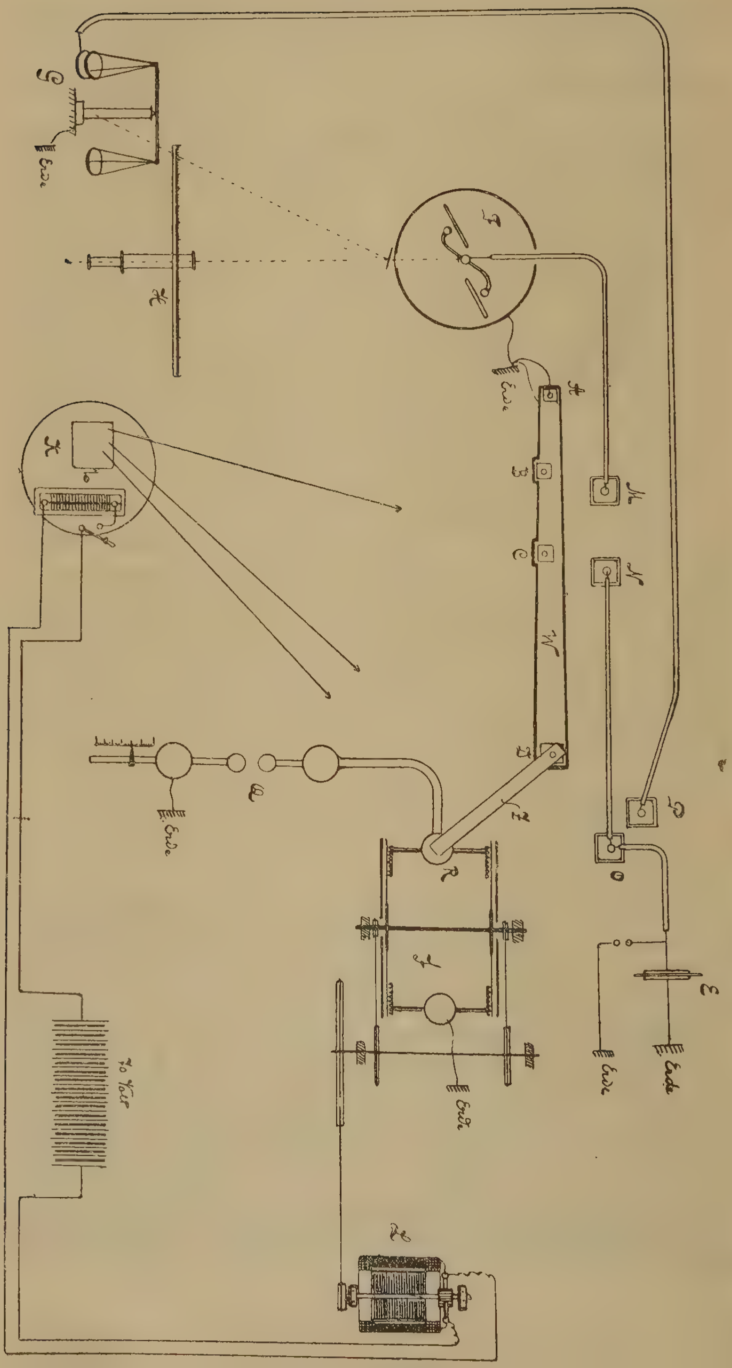
Stanniol belegt und so ebenfalls leitend mit der Gefässwandung verbunden. Von dieser führte eine Leitung durch das Spiegelgalvanometer $\left(\text{Empf. } 5 \cdot 10^{-10} \frac{\text{Amp.}}{\text{Skalenteile}}\right)$ nach der Erde. Durch den Messwiderstand wurde, gerade wie bei wirklichen Messungen, ein Strom unter 60 000[1]) Volt Spannung geschickt. Der Nullpunkt des Galvanometers stand sehr unruhig, es war daher in die Leitung noch ein Ausschalter gebracht, um durch abwechselndes Schliessen und Oeffnen auch kleine Ausschläge erkennen zu können. Es wurde nun am Spiegelgalvanometer kein erkennbarer Ausschlag konstatiert. Dass die Leitung in Ordnung war, ging aus dem Umstande hervor, dass bei Beginn und Schluss des durch den Messwiderstand fliessenden Stromes ein Ladestrom von 100 Skalenteilen und mehr durch das Galvanometer floss, der nach einigen Sekunden völlig verschwand. Zur Erreichung dieses Resultates war ein sorgfältiger Schutz des Gefässes vor influenzierenden Einflüssen notwendig. Namentlich die Maschine bewirkte auf dem nahe gelegenen Teile des Gefässes infolge Spitzenwirkung einen dauernden Entladestrom durch das Galvanometer. Erst als das Gefäss vorsichtig durch passend zusammengeklebte und mit Stanniol belegte, abgeleitete Pappgebilde vollständig elektrisch geschützt war, verschwanden die grossen Ausschläge, die zum Teil über die Skala gingen und einen Misserfolg bedeutet hätten.

In der Figur 9. ist eine Skizze der gesamten Anordnung gegeben.

Der Messwiderstand W ist mit der Influenzmaschine J durch die Zuleitung Z verbunden. Der Nebenschlussmotor L (70 Volt Spannung) treibt die Influenzmaschine an. — E ist eine Capacität von 600 cm, an die noch eine Funkenstrecke angeschaltet werden kann. Das Spiegelelektrometer mit Schutzcylinder wird durch F angedeutet, während G das absolute Plattenelektrometer bedeutet, welches links neben dem Beobachter erschütterungsfrei aufgestellt ist. Zur Rechten des durch Fernrohr H schauenden

[1]) Dies war die höchste Spannung, die zur Zeit dieser Versuche ohne Ueberanstrengung der Maschine für längere Zeit konstant gehalten werden konnte.

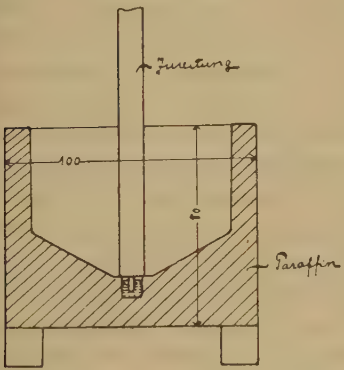
Figur 9.



Beobachters befindet sich ein Tischchen K, von dem aus mittelst Faden Ausschaltungen und Regulierungen vorgenommen werden können. Auch befindet sich hier ein Ruhstrat'scher Schleifwiderstand von 60 Ohm, durch den die Geschwindigkeit des Elektromotors geregelt werden kann.

B und C sind zwei Potentialabnahmestellen vom Messwiderstande. In ihrer Nähe befinden sich die Kontakte M und N. Figur 10. stellt einen solchen Kontakt dar. M ist durch Leitung in $1\frac{1}{2}$ cm weiten Glasröhren mit dem Spiegelelektrometer F fest verbunden, ebenso N mit der anderen Kontaktstelle O. Mittelst gebogener Leiter, die in Glasröhren und Paraffin sauber eingelegt sind, können zwischen M, N, B und C beliebige Schaltungen vorgenommen werden. Die Kontakte B C, M und N waren ursprünglich eng zusammengebaut. Da das nicht angeschaltete Elektrometer unerwünschte Ausschläge bis zu 10 Skalenteilen angab, glaubte ich auf schlechte Isolation schliessen zu müssen. Es wurde daher jeder Kontakt für sich aufgebaut; doch stellte sich auch jetzt noch zuweilen ein Ausschlag von ca. 2 Skalenteilen her. Nunmehr ergaben Versuche, dass der Ausschlag eine Influenzladung anzeigte, die von benachbarten Leitungen auf der parallelen Zuleitung zum Elektrometer erregt wurde. Deshalb wurde die Elektrometerleitung durch abgeleitete Pappflächen vor dieser Wirkung geschützt und auch an der Schaltstelle $\frac{B|C}{M|N}$ wurde zwischen Verbindungsleitungen, die auf verschiedenen Potentialen waren, Pappschirme geschoben.

Figur 10.



Kontaktstelle O ist fest mit Capacität E verbunden und kann ferner mit Kontakt P und damit mit dem Platten-

elektrometer, ausserdem aber mit Konduktor R der Influenzmaschine durch lösbare Leiter verbunden werden. Q ist eine Funkenstrecke, an der später verschiedene Versuche gemacht wurden.

Wie schon gesagt, war die spannungsliefernde Quelle eine zweiplattige Holtz'sche Maschine. Bei Beginn der Versuche versagte die Maschine mehrmals, hauptsächlich an feuchten Tagen. Doch nach vorausgegangenem Abdrehen und Abschmirgeln aller Hartgummiteile und Abwischen der Glasplatten liess sich ein besseres Resultat erzielen, wenn die Glasplatten durch die strahlende Wärme dreier Glühlampen während 2—3 Stunden erwärmt wurden. Auftretendes Ozon wurde nach dem Rat von Herrn Professor Des Coudres durch Terpentin absorbiert. Namentlich wenn man einige Tropfen auf die Glühlampen tröpfelte, entstand so viel Terpentindampf, dass wochenlang kein Ozongeruch wahrzunehmen war. Ein grosser Elektricitätsverlust entstand an der Stelle, wo der Konduktorträger die obere Fläche des Glaskastens durchsetzte; er liess sich nicht beseitigen; als daher im Winter infolge der Luftheizung das Zimmer sehr trocken geworden war, wurde der Glaskasten einfach weggenommen; während längerer Arbeitspausen wurden die Glasplatten zum Schutz vor Staub mit Tüchern bedeckt. —

Schon bei geringer Geschwindigkeit **einer** Glasscheibe $\left(\frac{200 \text{ Umdrehungen}}{\text{min.}}\right)$ wurden 60000 Volt erzeugt; doch erst mit $\frac{500 \text{ Umdrehungen}}{\text{min.}}$ beider Scheiben, also mit der fünffachen Elektricitätsmenge liess sich das Maximum mit 94000 Volt gewinnen; da die Elektricitätsmenge und also auch das Potential der Tourenzahl annähernd proportional ist, so geht aus den mitgeteilten Zahlen hervor, welch' gewaltige Verluste mit Erhöhung der Spannung auftreten, und zwar nur durch dunkle Ausstrahlungen an der verhältnismässig kleinen Oberfläche des Konduktors und Zuleitungen. Nur aussergewöhnliche Vorrichtungen wie etwa die 60-plattige Töpler'sche Maschine dürften beträchtlich über 100000 Volt liegende Potentiale zu erreichen gestatten.

VI.

Es war das Nächstliegendste das Widerstandsverhältnis auf galvanometrischem Wege durch Messung der Absolutwerte der einzelnen Teile festzustellen. Spannungs- und Strommessung lieferten den Widerstand als Quotienten; die erstere geschah mit einem Deprez-Instrument von Dr. Rudolf Franke & Co., Hannover, die letztere mit dem schon erwähnten Spiegelgalvanometer von Siemens & Halske. Die Empfindlichkeit des Galvanometers wurde für verschiedene Ausschläge sorgfältig bestimmt, sodass die Instrumente für sich eine Genauigkeit von 1 % erlaubt hätten. Der Versuch brachte jedoch Resultate, die um mehr als 5% von einander abwichen.

Die 3 Widerstände DC, CB, BA kann man offenbar in verschiedener Weise messen, je nachdem man sie einzeln oder summiert bestimmt. Man erhält so die Möglichkeit zur Kontrolle der Messung in sich. Alle möglichen Permutationen liessen sich nicht ausführen, da teilweise die Ausschläge zu klein wurden. Es wurde für das Verhältnis $\frac{AD}{AB} = 4,83$ und 4,13 gefunden, für das Verhältnis $\frac{AD}{AC} = 2,27$ und 2,10, die entsprechenden Mittel wären 4,48 und 2,18. Die Abweichungen mögen ihre Ursache in Polarisationen, Kontakpotentialen etc. haben; die gebrauchte Messspannung betrug 70 Volt; erweckte elektromotorische Kräfte von 1– 2 Volt in summa machen da natürlich schon Beträchtliches aus.

Die Bedenken gegen diese Methode wurden noch durch die Ueberlegung verstärkt, dass ein 1000 mal $\left(= \frac{70\,000}{70}\right)$ stärkerer Strom den Widerstand trotz verhältnismässig gleichmässigen Holzmaterials doch noch in unliebsamer Weise verändern könnte. Ich suchte deshalb nach einem Verfahren, mit einer noch direkt messbaren Hochspannung von etwa 20000 Volt das Verhältnis direkt bestimmen zu können. Man könnte daran denken, den Holzwiderstand bei A nicht direkt mit der Erde zu verbinden, sondern den Strom erst durch ein Galvanometer zu schicken und zu messen. Ich machte in dieser Richtung auch Versuche,

doch waren auch hier durch die Schwierigkeit, das Potential konstant zu halten und durch die Erwärmung der Widerstände die Genauigkeitsgrenzen ziemlich weite. Dagegen konnte ich mit einem anderen Verfahren eine Genauigkeit von 1 % erzielen. Ich benützte hierbei das absolute Elektrometer als Hilfsmittel, um eine willkürlich genommene Spannung von etwa 20000 Volt nach Belieben oft und genau zu erkennen. Das Elektrometer brauchte dazu nicht sorgfältig justiert zu werden, da es für eine Messreihe immer dasselbe Potential anzeigte, dessen absolute Grösse gleichgiltig war. Es liesse sich deshalb für diesen Zweck das Instrument unter Umständen durch einen ganz einfachen Apparat ersetzen.

O war für die Dauer der ganzen Messung mit P und R in Verbindung, sodass das Plattenelektrometer immer direkt an der Influenzmaschine lag.

Die Messung zerfiel in folgende Phasen:

1) N mit M verbunden; Ausschlag am Spiegelelektrometer; Potential durch Reguliervorrichtung allmählich erniedrigt, bis Wage ausschlägt. Ausschlag α.
2) Verbindung M-N gelöst; M mit C verbunden, Potential wieder erniedrigt, bis Ausschlag β bei Umkippen der Wage.
3) Wiederholung von 1) zur Kontrole, ob Nichts verändert.

Wären die Spiegelelektrometerausschläge genau proportional den Quadraten der Spannungen, so wäre das Widerstandsverhältnis $\frac{AD}{AC}$

$$10)\quad \frac{AD}{AC} = \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}}.$$

Der Abweichungen halber von der Proportionalität empfahl sich die Umrechnung auf Volt mit obiger Tabelle.

Nach Messung 2) kann man noch das Verhältnis $\frac{AD}{AB}$ und durch Kurzschliessen des Widerstandes CD mittelst der Verbindung N—C auch das Verhältnis $\frac{AC}{AB}$ bestimmen.

Dem Ausschlag α wurde ein möglichst grosser Wert gegeben; er betrug meist zwischen 320 und 350 Skalen-

teilen, entsprechend einer ungefähren Spannung von 20 000 Volt. Infolge der quadratischen Proportionalität werden die Ausschläge β immer noch verhältnismässig klein; für Verbindung C—M wurde er unter den gewählten Verhältnissen ca. 70 und für Verbindung M—B nur noch 17 Skalenteile. Vergrösserung des Ausschlages wäre nur durch Verkleinerung des Widerstandsverhältnisses $\frac{AD}{AX}$ zu erreichen; für Erreichung einer Messgrenze von ca. 100 000 Volt aber musste bei dem gegebenen Elektrometer das Verhältnis $\frac{AD}{AB}$ gegen 4,5 betragen. Hauptsächlich zur besseren Messung des Verhältnisses $\frac{AD}{AB}$, aber auch zur Messung relativ kleinerer Potentiale wurde deshalb das Verhältnis $\frac{AD}{AC}$ noch eingeschoben.

Ist nämlich

$$AB = a,\quad BC = b,\quad CD = c,$$

so ist

$$11)\quad \frac{AD}{AC} = \frac{a + b + c}{a + b} = m,$$

$$12)\quad \frac{AC}{AB} = \frac{a + b}{a} = n,$$

durch Multiplicieren folgt

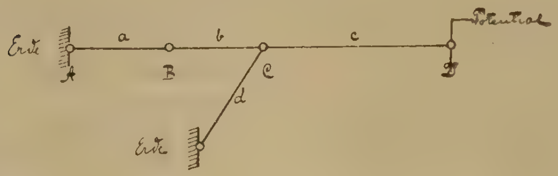
$$13)\quad \frac{AD}{AB} = \frac{a + b + c}{a} = (m\ n).$$

m ist ohne weiteres zu bestimmen, n nach Kurzschliessen des Widerstandsteils CD; jetzt erhielt man für n auch einen Ausschlag von ca. 75 Skalenteilen.

Es war noch der Einfluss des konstanten Verluststromes zu untersuchen, der durch die Isolationsmaterialien des Elektrometers und seiner Zuleitungen floss. Im Abschnitt IV. ist die Grösse dieses Widerstandes, der von M aus rechnet, bestimmt worden.

Beim Messen des Verhältnisses m ist der Isolationswiderstand d des Elektrometers parallel zu dem Widerstand (a + b) geschaltet. (Figur 11.)

Figur 11.



Experimentell wird daher in Wahrheit bestimmt

$$14)\quad m = \frac{\frac{(a + b)\,d}{(a + b) + d} + c}{\frac{(a + b)\,d}{(a + b) + d}}.$$

Daraus folgt durch Umformen

$$15)\quad m = \frac{a + b + c}{a + b} + \frac{c}{d}.$$

Analog folgt für n

$$16)\quad n = \frac{a + b}{a} + \frac{b}{d}.$$

Multiplicieren wir gemäss dem Obigen jetzt 15) und 16), so ist also in Wahrheit

$$17)\quad (m\,n)_{,} = \frac{a + b + c}{a} + \frac{a + b}{a}\,\frac{c}{d} + \frac{a + b + c}{a + b}\,\frac{b}{d} + \frac{bc}{d^2}$$

Es war nun

$$\begin{aligned} a &= 2{,}5 \,.\, 10^9 \text{ Ohm,} \\ b &= 2{,}6 \,.\, 10^9 \quad \text{„} \\ c &= 2 \,.\, 10^9 \quad \text{„} \\ d &= 3 \,.\, 10^{12} \quad \text{„} \;; \end{aligned}$$

deshalb wird, unter Vernachlässigung des Gliedes $\frac{bc}{d^2}$

$$18)\quad (m\ n)_1 = \frac{a+b+c}{a} + \frac{5{,}1}{2{,}5}\,\frac{c}{d} + \frac{11{,}1}{5{,}1}\,\frac{b}{d}$$
$$= \frac{a+b+c}{a} + 2\,\frac{b+c}{d}\,\text{(nahezu)}.$$

Würde man jetzt (m n) **direkt** durch Messung bestimmen — wie man es nachher auch zu Potentialmessungen braucht — so wäre, analog den Gleichungen 14) und 15) zu setzen

$$19)\quad (m\ n) = \frac{a+b+c}{a} + \frac{b+c}{d}.$$

Die Differenz von 18) und 19) ergiebt den Fehler:

$$20)\quad (m\ n)_1 - (m\ n) = \frac{b+c}{d}$$
$$= \frac{8.6\ .\ 10^{9}}{3\ .\ 10^{12}}$$
$$= 3\ .\ 10^{-3}.$$

(m n) selbst beträgt ungefähr 4,5; der eingesetzte Wert von d ist der ungünstigste, der bei feuchtem Wetter beobachtet wurde; selbst ein 10mal kleinerer Wert von d würde erst eine Aenderung des Resultates von (m n) um 1 % herbeiführen; ausserdem würde man in solchem Falle noch eine Korrektion einführen können, da es ein leichtes wäre d zu bestimmen.

Um eine Anschauung davon zu geben, wie genau gearbeitet werden konnte, gebe ich in Tabelle 7. eine Messungsreihe, wie sie anfangs oft gemacht wurden, um über das Messverfahren Erfahrungen zu sammeln.

Unter D, C, B_2 sind die Potentiale bei den bezüglichen Verbindungen mit M zu verstehen, auch für B_1 gilt das, nur mit dem Unterschiede, dass DC kurzgeschlossen war.

Tabelle 7.

D		C		B_1	
Skalenteile	Volt	Skalenteile	Volt	Skalenteile	Volt
355		75,4		78,5	
356		75,4		78,5	
355,5		75,4	9960	78,5	10160
356	21100				

C		D		B_2	
Skalenteile	Volt	Skalenteile	Volt	Skalenteile	Volt
74,6		354,1		17,8	
74,8		354,2		17,8	
74,8		354,2	21050	17,8	4840
74,8	9920				

Für D und C sind je zwei Aufnahmen gemacht, die maximale Abweichung beträgt 0,4 %. Es berechnet sich

$$m = \frac{21075}{9940} = 2,120.$$

$$n = \frac{21075}{10160} = 2,075.$$

Daraus

$$(m\ n) = 2,120\ .\ 2,075$$
$$= 4,40.$$

Die direkte Bestimmung lieferte

$$(m\ n)_1 = \frac{21075}{4840} = 4,36.$$

Die direkte Bestimmung von $(m\ n)_1$, obgleich zur Berechnung unnötig, wurde öfters gemacht, weil sie ein gutes

Mittel war zur Kontrolle über die ganzen Messungen. Grössere Abweichungen als 1—1½ % durften nicht stattfinden.

Anstatt des Plattenelektrometers kann man zur Fixierung einer bestimmten Hochspannung auch Funken benützen an einer solid montierten Funkenstrecke. Auch hiermit kann man eine verhältnismässig hohe Genauigkeit in der Aichung des Widerstandsverhältnisses erreichen. Während der Vorversuche wurden einmal zwei Widerstandsverhältnisse mit Hilfe des Plattenelektrometers, darauf dann mit Hilfe von Funken bestimmt.

Mit Plattenelektrometer bestimmt	2,184	bezw.	2,856 ,
„ Funken „	2,16	„	2,83 ,
Differenz	1 %	bezw.	0,9 %.

Ein Arbeiten mit Funken erfordert eine grössere Zahl von Einzelmessungen, da diese grössere Abweichungen von einander zeigen können, als die Messungen mit dem absoluten Elektrometer; bei dem letzteren genügten 2—3 Einzelbeobachtungen in den meisten Fällen.

Nach Fertigstellung des definitiven Widerstandes war es zunächst wichtig festzustellen, ob sich das Widerstandsverhältnis bei Messungen von mehreren Stunden infolge Erwärmung änderte. Zu diesem Zweck wurde mehrere Stunden lang ein Strom unter einer Spannung von 60000 Volt durch den Widerstand geschickt, und in Zwischenräumen wurde schnell das Widerstandsverhältnis bestimmt. Da die Isoliermasse auch ein guter Wärmeisolator, behielt der Holzstab für kurze Zeit die höhere Temperatur, die etwa bei dem vorher durchgeschicktem, stärkeren Strom auftrat, bei; eine schnell hinterher erfolgende Messung hätte also auch etwaige Veränderungen durch diese Temperatur nachweisen müssen; die Veränderungen, die auf diese Weise gemessen wurden, waren meist vernachlässigbar, die Erwärmung noch zu gering.

Tabelle 8.

Werte von	m	(m n)
zu Beginn der Untersuchung	2,12	4,40
nach 1 Stunde Stromdurchgang	2,13	4,41
„ 3 Stunden „	2,12	4,40

	Werte von	m	(m n)
am nächsten Tage nach weiterem, 6-stündigen Stromdurchgang		2,13	4,41 .

Das Mittel aus diesen Beobachtungen war 2,13 und 4,40, giltig für die Anfangsmessungen im Oktober; selbst für mehrere Stunden lang dauernde Messungen war das Widerstandsverhältnis genügend konstant.

Es blieb der Wunsch bestehen, noch direkt festzustellen, ob sich die Aichung der Messwiderstände bei den hohen Spannungen änderte. Ein kleiner Holzwiderstand von $\frac{1}{5}$ der Länge des Messwiderstands, also von 23 cm ungefähr, der den gleichen Querschnitt und gleiche Beschaffenheit wie der Messwiderstand besass, wurde ganz genau wie dieser in Isoliermasse eingebaut und bei einer Spannung zwischen 5000 und 20 000 Volt untersucht; der durch den Holzstab fliessende Strom wurde mit einem Wiedemann'schen Galvanometer gemessen. Die Stromstärke und der Spannungsabfall pro cm Länge des Holzstabes waren bei diesem kleinen Widerstand dieselben wie beim Messwiderstand unter fünffach grösserer Spannung. Es ergab sich

Tabelle 9.

Volt	Strom in Skalenteilen α	$\frac{\text{Volt}}{\alpha}$	
5470	42,5	129	
7450	58	128	
10330	80	129	Grösste Abweichung
12850	101	127	129 — 123 = 6,
15600	121	129	d. h. 4,7 %
17700	142	125	auf das Mittel
20220	165	123	126.
15600	123	127	
9870	77	128	

Unter genau denselben Versuchsbedingungen wurde jetzt dieselbe Messung wiederholt für den Messwiderstand; dabei wurde die Spannung gemessen durch Verbinden der Punkte M und B mit Hilfe des bekannten Verhältnisses 4,40, dabei erhielt ich Tabelle 10.

Die Zahlen dieser Tabelle sind Mittelwerte von je 3—6 Beobachtungen; es war schwierig, die hohen Spannungen genügend konstant zu halten. Die Messung war nur durchzuführen durch Assistenz eines zweiten Beobachters zur Beobachtung des einen Instrumentes.

Tabelle 10.

Volt	Strom Skalenteile α	$\frac{\text{Volt}}{\alpha}$	
92800	231	40,2	Grösste Abweichung 41,9—40,2 = 1,7, d. h. 4,3 % auf das Mittel 40,0.
73300	181	40,5	
49800	121	41,2	
38700	93	41,6	
28100	67	41,9	

In Tabelle 9) und 10) ist der Sinn der Abweichung des Quotienten $\frac{\text{Spannung}}{\text{Strom}}$ von der Proportionalität mit grösser werdender Spannung derselbe, ferner ist die Grösse der Abweichung bei beiden Messungen ebenfalls gleich; denn

für $\frac{20220}{5470}$ = 3,7-fache Spannungsteigerung zeigt die 1. Messung 4,7 % Abweichung,

" $\frac{92800}{28100}$ = 3,3- " " " " 2. " 4,3 % " .

Weil nun bei erster Messung die Spannungsmessung direkt geschah, also einwandfrei auf etwa 1 % richtig war, war auch die Spannungsmessung im zweiten Falle exakt, da die Abweichungen des Quotienten $\frac{\text{Spannung}}{\text{Strom}}$ bei beiden Messungen prozentual gleich gross waren. Die Abweichungen rührten also von der Versuchsanordnung her.

Dass der Messwiderstand auch für stundenlangen Gebrauch konstantes Messverhältnis zeigte, war vorhin be-

sprochen worden; es erübrigt noch zum Schluss auch auf die Frage der Konstanz für längere Zeit einzugehen. Während der Monate Oktober bis Ende Januar betrug die grösste beobachtete Abweichung vom Anfangswerte 3,9 %, und zwar trat diese ein nach einem besonders langen Gebrauche des Widerstands; bei kürzerem und mehr normalem Arbeiten betrugen die Schwankungen nur die Hälfte. Im übrigen würden auch grössere zeitliche Veränderungen keine Bedeutung haben, da schon von der anfänglichen Bestimmung des Widerstandsverhältnisses her alle Vorrichtungen vorhanden sind, die auch nachher zu dessen Bestimmung dienen. Eine solche Bestimmung des Widerstandsverhältnisses liess sich je nach Uebung in 10 bis 20 Minuten ausführen.

Tabelle 11.

No.	Tag	m	(mn)	Bemerkungen
1	Okt. 1902	2,13	4,40	Nach den Anfangsmessungen im Oktober wurden 8 Tage lang mindestens 2 Stunden täglich 70000 Volt dauernd auf den Widerstand geschaltet. Eine in dieser Zeit ausgeführte Messung ist die am 1. Novbr. Am letzten Tage wurde Messung 3 gemacht. Hier trat die erwähnte grösste Abweichung auf. Es schien jetzt eine grössere Erwärmung des Holzstabes erreicht zu sein. Bei der Messung 4 wurde deshalb vor und nach einem zweistündigen Dauerstrom (70000 Volt) das Verhältnis bestimmt und auch eine Aenderung konstatiert. — In der folgenden Zeit wurde der Messwiderstand nur noch normal benutzt, wie andere Messungen es erforderten, oft nur ½ Stunde. Er kühlte sich infolge dessen wieder ab; das Widerstandsverhältnis war hinfort ziemlich konstant; Bestimmungen vor und nach zweistündigem Arbeiten, wie am 8. u. 10. Novbr., zeigten keinerlei Aenderungen. Von Ende November ab wurde mit tagelangen Pausen der Widerstand benützt; das Widerstandsverhältnis erhielt jetzt wieder seinen ursprünglichen Wert.
2	1. Novbr. „	2,14	4,39	
3	4. Novbr. „	2,08	4,23	
4	5. Novbr. „	2,13 2,10	4,37 4,28	
5	6. Novbr. „	2,10	4,28	
6	7. Novbr. „	2,10	4,26	
7	8. Novbr. „	2,12 2,11	4,33 4,34	
8	10. Novbr. „	2,10 2,12	4,34 4,33	
9	12. Novbr. „	2,10	4,33	
10	13. Novbr. „	2,10	4,33	
11	22. Novbr. „	2,13	4,37	
12	24. Novbr. „	2,14	4,41	
13	8. Dezbr. „	2,13	4,43	
14	6. Jan. 1903	2,11	4,34	Nach dreiwöchentlicher Pause wurde die 14. Messung gemacht; darauf wurde der Widerstand wieder normal benutzt.
15	22. Jan. „	2,15	4,47	

Anwendungen der Methode.

VII.

Funkenpotentiale in Luft. Um die Brauchbarkeit der Methode zu zeigen, sind im Folgenden Messungen von Funkenpotentialen mitgeteilt worden, deren absolute Höhe weit über den Zahlen liegt, die bislang auf gewöhnliche Weise zu erreichen waren. Am weitesten ist Heydweiller gekommen, der noch eine Messung von 48000 Volt angiebt. Alle übrigen Beobachter, Baille, Freyberg, Paschen haben 30000 Volt nicht überschritten.

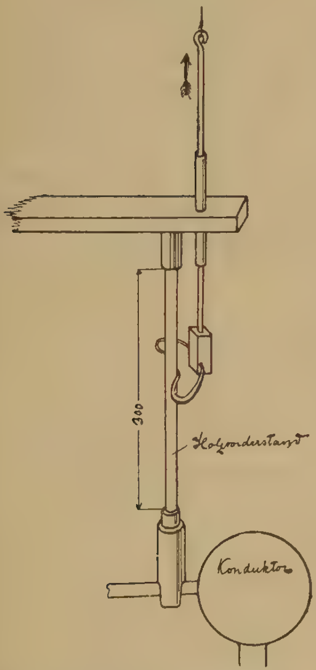
Waren schon bei Verbindung des Messwiderstandes mit der Influenzmaschine Schwierigkeiten bezüglich Glimmentladungen entstanden, so waren doch diese Schwierigkeiten gegenüber den jetzt auftretenden recht kleine zu nennen. Eine starre Verbindung zwischen Influenzmaschine und Funkenmikrometer verbot sich von selbst, da der Träger des Konduktors der Influenzmaschine infolge der Rotation der Scheiben erzitterte und die Funkenstrecke vor solchen Erschütterungen geschützt werden musste. Eine etwas nachgiebige Verbindung wurde durch eine etwa 1 m lange Litze (wie für Lichtleitungen gebraucht) hergestellt. Sie wurde durch Paraffin gezogen und noch mit zwei Gummischläuchen von starken Wänden überzogen. An den Stellen, wo die Litze sich an die Elektroden anschloss, wurde der Schlauch weit über diese weg gezogen und mit Paraffin noch umschlossen. Dies letztere geschah bei halbweichem, knetbaren Zustande des Paraffins; der hierdurch erreichte Schutz war natürlich in seinen Wirkungen nicht mit dem eines durch Guss erreichten Paraffinmantels zu vergleichen, ein Giessen war aber nach Lage der einzelnen Teile unmöglich. Es ist infolgedessen oft das Paraffin von Büscheln durchschlagen worden — damit aber war ein derartiger Verlust gegeben, dass kaum eine Spannung von 70000 Volt zu erreichen war. Am Schlauche selbst habe ich selten Büschelentladungen bemerkt, immer nur an den Ansatzstellen.

Um Influenzwirkungen tunlichst zu vermeiden, wurde die Funkenstrecke ziemlich weit vom Boden und von den Stützen aufgebaut. Die Höhe über dem Boden betrug 40

cm; die Stützen waren ebenfalls 40 cm von einander entfernt und trugen auf ihrem Ende Holzkugeln, in denen sich die Zuleitungen zu den Kugeln der Funkenstrecke verschieben liessen; der nächste Tisch war 55 cm, die Influenzmaschine 100 cm entfernt. Diejenige Stütze, auf welcher die mit der Maschine verbundene Kugel sich befand, war zuerst aus 2 cm dickem Jenenser Bleiglas in Stabform hergestellt. Die Beobachtung im Dunkeln zeigte, dass sich über die Oberfläche des Glases ein fortwährender Glimmstrom nach dem Erdboden ergoss, weshalb auch anfangs überhaupt kein hohes Potential zu erlangen war. Eine Erwärmung des Glasstabes und nachfolgende Bekleidung mit einer dünnen, heiss aufgetragenen Paraffinschicht änderte an der Erscheinung leider nichts, sodass der Glasstab durch einen Hartgummistab ersetzt werden musste. Der Hartgummistab bewährte sich sehr gut; über Verluste an dieser Stelle war nicht mehr zu klagen. Zur Messung der Abstände diente die mit Nonius versehene Teilung eines kleinen Funkenmikrometers, die am freien Ende der abgeleiteten Elektrode parallel zur Zuleitungsachse befestigt wurde. Mit dieser Zuleitung wurde eine kleine horizontale und verschiebbare Fläche verbunden, die halb mit einem Spiegel, halb mit weissem Papier bedeckt war, die Trennungslinie beider lief parallel zur Zuleitungsachse; auf dem Papier befand sich ein schmaler schwarzer Strich. Die bewegliche Stütze des genannten kleinen Funkenmikrometers wurde durch eine kleine Säule ersetzt; an diese war ein horizontaler Blechstreifen gelötet, der über der Spiegelfläche ein kleines Fenster besass, das Kreuz des Fensters wurde durch einen 0,03 mm dicken Messingfaden gebildet. Die Einstellung wurde durch Decken des Fadens mit dem Strich auf dem Papier bewirkt, wobei Parallaxe durch gleichzeitiges Decken des Fadenspiegelbildes mit dem Faden selbst verhindert wurde. Versuche stellten fest, dass auf solche Weise die Abstände mit 1 $^0/_0$ Genauigkeit eingestellt werden konnten. Die Influenzmaschine wurde durch Elektromotor angetrieben; bei Potentialen bis etwa 60000 Volt lief nur eine Scheibe; beide Scheiben zusammen lieferten bei grösstzulässiger Geschwindigkeit 94000 Volt. Die Funkenpotentiale wurden teils durch allmähliche Er-

höhung der Geschwindigkeit, teils auch mit Benützung einer Reguliervorrichtung erreicht; im Augenblick wo der Funke überging, sprang der Ausschlag zurück. Die Reguliervorrichtung bestand aus einem senkrecht stehenden Holzwiderstand, etwa 30 cm lang (Figur 12.) Er wurde lösbar mit der Influenzmaschine verbunden, sein anderes Ende fand einen Halt in einem darüber montierten Holzbalken. Längs des Holzstabes konnte ein federnd anliegender und mit der Erde verbundener Drahtbügel verschoben werden, und zwar geschah diese Bewegung mittelst des oben erwähnten Uhrwerks neben dem Beobachter. Der Holzstab bestand aus ganz trockenem Material von hohem Widerstande; der für den Versuch passende Widerstandswert wurde durch stärkeres oder schwächeres Einreiben mit Graphit erreicht. Die Regulierungsvorrichtung war namentlich für grössere Elektricitätsmengen viel brauchbarer als die bekannte Methode mit einer Spitze. Sie wurde später auch zur Potentialerniedrigung bei der Messung des Widerstandsverhältnisses benützt.

Figur 12.



Die von Heydweiller angegebenen Korrektionen für Veränderung der Temperatur und des Barometerdrucks konnten für hohe Potentiale nicht geprüft werden, da die Abweichungen zu klein waren (1 % Zunahme des Funkenpotentials für + 8 mm Druck über 745 mm Hg und — 3° C. Temperatur unter 18° C.); sie waren jedenfalls nicht grösser. Polare Unterschiede wurden nicht beobachtet, mit einer positiv geladenen Kugel von 3 cm Radius, im Abstand von ca. 3 cm von einer gleich grossen abgeleiteten

Kugel, erhielt ich ein Funkenpotential von 80100 Volt, mit derselben Kugel negativ geladen, 79800 Volt.

Bei geringeren Geschwindigkeiten der Maschine war der Gang zuweilen sehr ungleichförmig infolge der grossen Reibung, die durch die zweifache Uebersetzung der Tourenzahl des Elektromotors verursacht wurde. Infolgedessen kamen auch bei den niederen Potentialen grosse Abweichungen zwischen den Einzelbeobachtungen derselben Messungsreihe (bis 3 %) vor, doch sind die Messungen der Funkenpotentiale im allgemeinen auf 2 % genau, wie die an verschiedenen Tagen angestellten Beobachtungen desselben Funkenpotentials erwiesen. In Tabelle 12. gebe ich je ein Beispiel für eine schlechte und gute Messung desselben Funkenpotentials an verschiedenen Tagen.

Tabelle 12.

Kilovolt. Kugelradius 2,5 cm.

Abstand 2 cm.

5. Novbr.	57,4	Grösste Abweichung 1,8 %.
6. Novbr.	57,3	
10. Novbr.	58,3	

Abstand 5 cm.

5. Novbr.	89,8	Grösste Abweichung 0,5 %.
6. Novbr.	89,4	
7. Novbr.	89,6	

Die Funkenpotentiale wurden zwischen Kugeln von 2, 2,5 und 3 cm Radius ermittelt; die Kugeln wurden auf der Drehbank mit Stearinsäure und Wiener Kalk geputzt und vor der Messung erst mit einigen Funken beschickt.

Meine Untersuchungen gehen aus von Funkenpotentialen, deren Werte bislang gerade noch gemessen werden konnten. Die gemeinschaftlichen Werte geben ein Urteil über die erreichbare Genauigkeit.

Für gleiche Temperatur und gleichen Luftdruck ergiebt sich

Tabelle 13.

Kilovolt. r = 2,5 cm.

Abstand der Kugeln cm	Heydweiller Paschen	Eigene Messungen	Differenz	
0,1	32,7	32,0	2,2 %	Die grössere Abweichung bei der ersten Messung erklärt sich ohne Zwang durch die grössere Ungenauigkeit bei der Einstellung kleinerer Abstände.
0,12	38,4	37,8	1,6 %	
0,14	43,8	43,4	1 %	
0,16	48,6	48,1	1 %	

In Verbindung mit den Werten von Paschen und Heydweiller für kleine Kugeln ergiebt sich jetzt folgende Tabelle der Funkenpotentiale.

Tabelle 14.

Kilovolt. r = Radius in cm.

Kugelabstand cm	r = 0,25	0,5	1,0	2,0	2,5	3
0,1	4,83	4,80	4,71			
0,2	8,37	8,37	8,10			
0,3	11,3	11,7	11,7			
0,4	13,8	14,4	14,4			
0,5	15,6	17,4	17,4			
0,6	17,1	19,8	20,4			
0,7	18,3	21,9	23,1			
0,8	18,9	24,0	26,1			
0,9	19,5	25,5	28,8			
1,0	20,1	27,0	31,2			
1,2			35,4	38,0	38,0	37,8
1,4			38,7	43,4	43,4	43,4
1,6			41,4	47,5	48,1	48,4

Kugelabstand cm	r = 0,25	0,5	1,0	2,0	2,5	3
1,8				51,5	53,5	54,5
2,0				54,5	57,7	58,7
2,5				61,4	67,0	69,6
3,0				66,7	73,0	78,0
3,5				70,6	78,2	84,2
4,0				73,6	82,4	89,4
4,5				75,7	86,0	93,8
5,0				77,9	89,6	

Im allgemeinen pflegt man die Potentiale von Funkenstrecken bei weitem zu überschätzen, namentlich Potentiale von Funken, die an den eigenen Konduktoren der Influenzmaschine gewöhnlich zwischen verhältnismässig kleinen Kugeln und ganz in der Nähe der stark influenzierenden Glasscheiben erzeugt werden, nimmt man in der Regel viel zu hoch an.

Die Säulen der benützten Influenzmaschine, welche die 8 cm im Durchmesser messenden Konduktorkugeln trugen, waren 55 cm entfernt; der Radius der Kugeln, zwischen denen die Funken übersprangen, betrug 1,25 cm, die Dicke der verschiebbaren Zuleitungen, an deren Enden die letzten Kugeln befestigt waren, war 1,5 cm, also sehr beträchtlich. Für diese Anordnung an der Maschine selbst wurden bei 750 mm Barometerstand und 18° C. Temperatur folgende Funkenpotentiale festgestellt.

Tabelle 15.

Kugelabstand cm	Potential Kilovolt	Bemerkungen
2	48	Die Messungen beziehen sich auf Funken, denen ein allmähliches sekundenlang andauerndes Potentialanwachsen vorangeht.
3	55	
4	63	
5	67	
6	68	

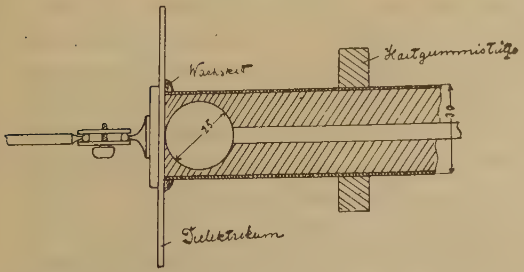
7	70
10	71
12	74
14	77
16	konstante Ausströmung bei etwa 87, je nach Geschwindigkeit der Maschine verschieden.

VIII.

Funkenpotentiale in festen Dielektricis. In neuerer Zeit ist von Almy[1]) eine Arbeit über Durchschlagspotentiale fester Dielektrika (bis max. 40000 Volt) erschienen. Es erschien mir wünschenswert, auch für höhere Potentiale das Verhalten bekannterer Dielektrika kennen zu lernen.

Nach dem Beispiele Almys schliff ich ein Glasrohr von etwa 30 mm Durchmesser an einer Stirnseite oben an und kittete eine Kugel (Durchmesser 25 mm) mit Wachskitt ($^1/_2$ Kolophonium + $^1/_2$ Wachs) derart in dem Rohre ein, dass die Ebene der Stirnseite die Kugel tangential berührte; das Dielektrikum, in quadratischen Platten von 6 bis 15 cm Seitenlänge, wurde hier fest aufgelegt. Bei höheren Potentialen bricht sich nur zu leicht über die Oberfläche ein Funkenstrom hindurch; diesen zu vermeiden, wurde das Dielektrikum noch durch Wachskitt mit dem Glasrohr ziemlich dicht verbunden (Figur 13.). Die andere zur Erde abgeleitete Elektrode wurde durch eine kleine, 30 mm im Durchmesser messende ebene Platte gebildet, der ein doppeltes Kugelgelenk eine reichliche

Figur 13.



[1]) Ann. d. Phys. I. p. 508. 1900.

Bewegungsmöglichkeit verlieh; diese war nötig, um die Elektrodenplatte fest an das Dielektrikum drücken zu können.

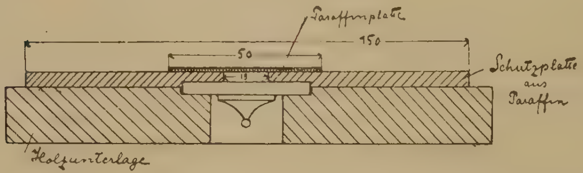
a) **Glimmer.**

Zur Verfügung hatte ich ausgesuchtes Material, das ganz klar, fast farblos und dem Ansehen nach vollständig luftfrei war; es stammte von A. Rafael, Breslau. Trotz dieses guten Materials kam ich zu keiner regelmässigen Kurve, für Platten zwischen 0,2 und 1 mm Dicke erhielt ich Funkenpotentiale zwischen 25000 und 54000 Volt als Grenzwerte.

b) **Paraffin.** (Schmelzpunkt 52⁰).

Dünne Paraffinplatten von genügend grosser Seitenlänge herzustellen war sehr schwierig. Deshalb erhielt hier die abgeleitete Elektrode eine besondere Form (Figur 14.); die kleine kreisrunde Fläche (Durchmesser

Figur 14.



15 mm), die an der zu untersuchenden Paraffinplatte lag, lag in einer Ebene mit der einen Fläche einer dickeren (3 mm) Paraffinplatte, mit welcher die Elektrode möglichst fest verbunden war. Um jetzt die eigentliche Platte auf dieser Fläche befestigen zu können, wurde die Elektrode samt dicker Paraffinplatte auf einer hölzernen Unterlage aufgestellt und nun kleine, 2 mm dicke Paraffinplatten von (5 $\times$ 5) cm^2 Fläche, die durch vorsichtiges Erwärmen über einer Bunsenflamme plastisch weich gemacht waren, schnell aufgelegt und mit geeignetem Werkzeug fest aufgepresst. Die Ränder wurden noch besonders verschmolzen. Die gewünschte Dicke wurde schliesslich mit einer Spachtel (Stahlblech mit stumpfer Kante) durch Schaben hergestellt. Die zur Verwendung kommenden Plättchen wurden mittelst Bandsäge aus den gewöhnlichen Platten des Handels hergestellt

und wurden natürlich aus einer grösseren Zahl sorgfältig ausgewählt; in der Durchsicht und unter dem Mikroskop (bei 0,2 mm Dicke) zeigte sich ein ganz gleichförmiges Gefüge. Auf diese Weise sind ca. 20 Messungen gemacht worden. Die Werte wurden graphisch aufgetragen; dabei zeigte es sich, dass der Mittelwert annähernd durch eine Gerade gegeben wird. Das Funkenpotential beträgt für je 0,1 mm ca. 8000 Volt + 40 % bis 1,2 mm. Platten von 2 mm konnten mit 100000 Volt auch nach minutenlanger Einwirkung nicht durchschlagen werden.

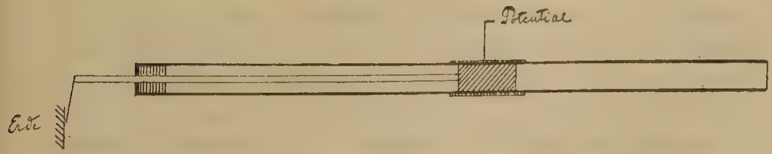
c) Hartgummi.

Almy giebt an, dass er eine Hartgummiplatte von 0,15 mm Dicke mit 40000 Volt nicht habe durchschlagen können. Er hatte die Platte durch mühsames Abschmirgeln aus dickem Material hergestellt. In Hinsicht auf praktische Bedürfnisse*) erschien es mir wichtiger, Material wie man es im Handel bekommt zu untersuchen; ich bezog deshalb von der Hannoverschen Gummi-Kamm-Compagnie sogenanntes Hartgummiblech von 0,25 und 0,5 mm Dicke, und zwar von bester Qualität, die erhältlich war. Das dünnere Material zeigte schon in der Durchsicht gegen eine starke Lichtquelle kleine Löcher, aber auch das dickere besass jedenfalls mikroskopisch kleine Durchbrechungen, wie die elektrische Untersuchung zeigte. Platten von 0,25 mm Dicke schlugen schon bei 22000, Platten von 0,5 mm schon bei 31000 Volt durch, allerdings nicht immer an der beabsichtigten Stelle, sondern etwas entfernt aus der Mitte.

d. Glas.

Von Jenenser Glas stand mir ein Bleiglas 386^{III} in

Figur 15.



*) Es sollte von dünnen Glasplatten mit noch dünnerer Hartgummizwischenlage ein Kondensator für ganz hohe Spannungen hergestellt werden.

Form von Röhren (10 mm Durchmesser) zur Verfügung.[1]) Figur 15. zeigt die Anordnung beim Versuch; die Röhre muss direkt in den Konduktor der Influenzmaschine geschoben werden. Röhren von 0,5 mm Wandstärke widerstanden der höchsten Spannung, solche von 0,4 mm wurden auch erst bei 82000 Volt durchschlagen; zwei Versuche gaben ein nur um wenige Prozente verschiedenes Resultat; übrigens erfolgte der Funkendurchbruch nicht sogleich mit Erreichen des bestimmten Potentials, sondern erst nach etwa ½—1 Minute.

Von Glasplatten stand mir ein gewöhnlich benutztes Material unbekannter Zusammensetzung und von verschiedener Herkunft zur Verfügung. Die Glasplatten hatten eine Dicke von 1 bis 5 mm; die Gläser liessen sich fast ohne Ausnahme mit 40000 bis 90000 Volt Funkenpotential durchschlagen; ein Glas von 3 mm Dicke nur widerstand jeder Beanspruchung. Es geht daraus hervor, dass das Jenenser Kaliglas 386^{III} allen andern Gläsern an Widerstandsfähigkeit gegen Durchschlag bei weitem überlegen ist.

IX.

Ausser der in dieser Arbeit beschriebenen Messmethode wurde im Sommersemester 1902 noch eine zweite, direkte Methode bei einer Reihe von Messungen untersucht, die jedoch kein brauchbares Resultat ergeben hat. Hierbei wurde das Spiegelelektrometer, das nachher mit Abänderungen auch bei der definitiven Messmethode benützt wurde, vollständig in gut isolierendes Oel untergetaucht. Schon bei verhältnismässig kleinen Spannungen traten dabei im Oel Konvektionsströme nach den abgeleiteten Gefässwänden ein, die zuerst immerhin noch eine Einstellung nicht hinderten; der Spiegel des Elektrometers konnte durch eine planparallele Glasscheibe, die in die Gefässwand eingekittet war, durch das Oel hindurch beobachtet werden.

Mit steigendem Potential jedoch kam das Oel in wirbelnde, kochende Bewegung; eine korrekte Messung war nicht mehr möglich. Ausserdem trat durch diese

[1]) Diese Röhren wurden von der Firma Schott & Genossen bereitwilligst zur Verfügung gestellt.

Konvektionsströme ein derartiger Verlust ein, dass das zu erreichende Potential weit unter 90000 Volt blieb. Es wurden Versuche mit Terpentin, Petroleum und Paraffinöl gemacht; bei allen drei Materialien wurde dieselbe Erscheinung beobachtet. Auch die Erwartung, dass ein dickeres Oel sich günstiger verhalten würde, wurde nicht erfüllt; das an und für sich schon ziemlich dickflüssige Paraffinöl wurde bei einem Versuch durch aufgelöstes Paraffin noch zähflüssiger gemacht. Auch hier trat durch unerwünschte Bewegungen in der Flüssigkeit ein Misserfolg auf, ganz abgesehen davon, dass es mir nicht geglückt war, ein vollständig klares Material zu erhalten.

Die Vermutung lag nahe, dass in dem Oel suspendierte Fremdteilchen die Ursache der Strömung seien. Eine gewöhnliche Filtration durch Papier half jedoch nichts, wie ein Versuch zeigte; ich griff daher zur Filtration durch eine Tonzelle unter Druck[1]). Dabei liess sich Terpentin in praktisch anwendbarer Frist noch durch die Tonzelle pressen, dagegen ging der Prozess mit Paraffinöl, selbst wenn es auf 50^0 erwärmt wurde, äusserst langsam vor sich, weshalb ich von Versuchen in dieser Richtung absehen musste. Auch zeigte sich beim gereinigten Terpentinöl durchaus kein anderes Verhalten als vorher, trotzdem ein kleines Versuchsgefäss ganz sorgfältig mit gereinigtem Oel vorher ausgespült war und u. a. auch die Flüssigkeitsoberfläche durch eine darauf gegossene Schicht von festem Paraffin vollständig gegen Staubteilchen aus der Luft geschützt wurde.

Selbst wenn für die benützte kleine Menge Oels ein Erfolg erzielt worden wäre, würde es doch fraglich geblieben sein, ob auch bei Berührung mit einem grossen Instrument, an dessen Oberfläche ja immer mikroskopisch kleine Fremdteilchen haften, die Flüssigkeit rein geblieben wäre. Auf jeden Fall aber würde eine Messmethode, die solch' peinliches und langwieriges Arbeiten erfordert, kaum für die praktischen Bedürfnisse des Laboratoriums empfehlenswert gewesen sein; dagegen haben wir in der oben beschriebenen Methode des Potentialabfalls ein sicheres

[1]) Ann. d. Phys. 7. p. 156. 1902.

und in anbetracht der hohen Spannungen auch einfaches Verfahren zur Messung solcher Spannungen gefunden.

Ich habe mich zum Schlusse noch einer angenehmen Pflicht zu entledigen und Herrn Professor Dr. Wien, dem Leiter des hiesigen Instituts, meinen herzlichsten Dank für die Anregung und Unterstützung auszusprechen, die er mir bei den Arbeiten stetig hat zu teil werden lassen.

Würzburg, Physikal. Institut, Januar 1903.

Lebenslauf.

Ich, Paul Ernst Voigt, evangelischer Konfession, wurde am 25. Oktober 1876 als Sohn des Chemikers Dr. phil. C. Voigt zu Granschitz bei Weissenfels, Prov. Sachsen, geboren und besuchte bis Ostern 1896 das Städtische Gymnasium zu Halle a. S., zu welchem Termine ich das Maturitätsexamen ablegte. Vorher war ich schon während einer anderthalbjährigen Schulunterbrechung zu meiner praktischen Ausbildung in einer mechanischen Werkstatt tätig gewesen.

Auf den technischen Hochschulen Braunschweig und Hannover und den Universitäten Genf, Leipzig und Würzburg lag ich technischen und naturwissenschaftlichen Studien ob; erstere beschloss ich durch Absolvierung des Diplom-Examens an der Technischen Hochschule Hannover, Dezember 1901.

In derselben Stadt war ich auch während meines letzten Studienjahres tätig in der Fabrik von Dr. Rudolf Franke & Co., wo ich mit der Ausarbeitung von Konstruktionen elektrischer Messinstrumente beschäftigt war.

In der Zeit vom Oktober 1899 bis ebendahin 1900 führte mich die Ableistung meiner Militärpflicht nach Cassel.

Allen meinen verehrten Lehrern, deren Unterricht ich während meiner Studienzeit genossen habe, sage ich an dieser Stelle meinen herzlichsten Dank.

Die Namen dieser Herren folgen hier:

in Genf:	Bouvier, Graebe, Soret (†);
in Braunschweig:	Bohnsack, Fricke, Kloos (†), Körner, Meyer, R. Müller, Otto, Peukert, Querfurth (†), Schöttler, Tröger, Weber;
in Leipzig:	Beckmann, Lie (†), Marschall, Paul, Wiedemann (†);
in Hannover:	Dieterici, Fischer, Frank, Franke, Frese, Heim, Keck (†), Kiepert, Kohlrausch, Müller, Paschen, Riehn, Thiermann;
in Würzburg:	Des Coudres, Hantzsch, Prym, Seitz, Voss, Wien.